

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tomislav Begić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ANALIZA UVJETA U VRELOVODNOM
KOTLU KOD PRELASKA S LOŽENJA
NA TEKUĆE GORIVO NA IZGARANJE
PLINOVITOG GORIVA**

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Tomislav Begić

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tomislav Begić**

Mat. br.: 0035177922

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza uvjeta u vrelovodnom kotlu kod prelaska s loženja na tekuće gorivo na izgaranje plinovitog goriva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of conditions in hot water boiler when switching from liquid fuel firing to combustion of gaseous fuel**

Opis zadatka:

Zbog adaptacije kotlovnice u smislu prelaska loženja vrelovodnog kotla s tekućeg goriva na plinovito gorivo potrebno je analizirati uvjete koji vladaju u kotlu u smislu osiguravanja sigurnog i učinkovitog pogona. Kotao je namijenjen dogrijavanju vrele vode u postojećoj toplani za daljinsko grijanje grada.

U radu je potrebno napraviti termodinamički, hidrodinamički i aerodinamički proračun vrelovodnog kotla:

- a) s izgaranjem na teško loživo ulje i
- b) s izgaranjem na prirodni plin.

Termodinamički proračun treba napraviti prema normativnoj (CKTI) metodi i odrediti stupanj iskoristivosti kotla. Hidrodinamički proračun treba napraviti za vodenu stranu kotla i izračunati padove tlaka te brzine strujanja vode u cijevima. Aerodinamički proračun uključuje proračun dimnog trakta kotla, s izračunom pada tlaka i brzine strujanja dimnih plinova.

Nakon toga treba usporediti izračunate parametre kod oba tipa loženja te donijeti zaključak da li postojeća geometrija kotla može udovoljiti zahtjevima loženja na prirodni plin.

Također treba napraviti dispozicijski nacrt kotla s najmanje jednim presjekom.

Osnovni podaci za kotao:

- Kapacitet: 34,89 MW (toplinske snage)
- Radni tlak: 24,5 bar
- Temperatura ulazne vode: 130 °C
- Temperatura izlazne vode: 160 °C

Potrebni podaci i literatura mogu se dobiti kod mentora. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 26. veljače 2015.
- 2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
- 2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Daniel R. Schneider

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Želio bih se zahvaliti svojem mentoru Prof.dr.sc.Danielu Rolphu Schneideru na literaturi i pomoći pri izradi ovog završnog rada.

Tomislav Begić

SADRŽAJ

1. UVOD	2
1.1. VRELOVODNI KOTLOVI	2
1.2. PLINSKA LOŽIŠTA I LOŽIŠTA NA TEKUĆE GORIVO [2]	2
2. PRORAČUN ZA TEKUĆE GORIVO	4
2.1. TERMODINAMIČKI PRORAČUN	4
2.2. HIDRAULIČKI PRORAČUN	25
3. PRORAČUN ZA PLINOVITO GORIVO	29
3.1. TERMODINAMIČKI PRORAČUN	29
3.2. HIDRAULIČKI PRORAČUN	47
4. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI	

POPIS SLIKA

Slika 1. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za tekuće gorivo	8
Slika 2. Shema optoka kotla.....	10
Slika 3. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za plinovito gorivo	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Entalpije pojedinih sudionika dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi.....	6
Tablica 2. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi	7
Tablica 3. Veličine stanja vode pri loženju na tekuće gorivo	10
Tablica 4. Svojsva dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi.....	17
Tablica 5. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za plinovito gorivo	31
Tablica 6. Veličine stanja vode pri loženju na plinovito gorivo	33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
P	MW	toplinska snaga
t	$^{\circ}C$	temperatura
p	bar	tlak
H_d	kJ/kg_B	donja ogrijevna vrijednost goriva
V_{O_2min}	m^3/kg_B	teorijska količina kisika potrebnog za izgaranje
V_{Lmin}	m^3/kg_B	teorijska količina zraka potrebnog za izgaranje
V_{sdpmin}	m^3/kg_B	teorijska količina suhih dimnih plinova
V_{sdp}	m^3/kg_B	stvarna količina suhih dimnih plinova
V_{vl}	m^3/kg_B	količina vlažnih dimnih plinova
V_{dp}	m^3/kg_B	ukupni volumen dimnih plinova
r		udio u dimnim plinovima
h	kJ/kg_B	entalpija
h_L	%	gubici na neizgorenom
h_Z	%	gubici zračenja na okolinu
η_L		stupanj djelovanja ložišta
η_Z		stupanj djelovanja zračenja na okolinu
h_A	%	gubitak osjetne topline dimnih plinova
η_K		stupanj djelovanja kotla
D	kg/s	količina zagrijavane vode
B	kg/s	količina goriva
Q	kW	izmijenjena toplota
q	kJ/kg_B	izmijenjena toplota
l_L	m	duljina ekrana
b_L	m	širina ekrana

h_L	m	visina ekrana
F	m^2	površina
V_L	m^3	volumen ložišta
ψ_L		stupanj ekranizacije
x		bezdimenzijski položaj maksimalne temperature
s_z	m	debljina stijenke cijevi
d_z	m	vanjski promjer cijevi
s	m	efektivna debljina sloja dimnih plinova koji zrače
ξ		uvjetni faktor zaprljanja
r_{RO}		udio troatomnih plinova u dimnim plinovima
ε_L		stupanj crnoće ložišta
t_p	m	poprečni korak cijevi
t_u	m	uzdužni korak cijevi
n_z		broj cijevi
N_z		broj cijevi u prvom redu
n_r		broj redova
w		brzina strujanja vode
C_C	$W/(m^2K^4)$	koeficijent zračenja crnog tijela
ν	m^2/s	kinematička viskoznost
λ	$W/(mK)$	koeficijent toplinske provodljivosti
Pr		Prandtlova značajka
α	$W/(m^2K)$	koeficijent prijelaza topline
a		koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova
ρ	kg/m^3	gustoća
λ		koeficijent trenja
ζ		koeficijent otpora strujanja
σ		srednji relativni dijagonalni korak cijevi

SAŽETAK RADA

U ovom radu izvršena je analiza uvjeta koji vladaju u vrelovodnom kotlu pri prelasku loženja s tekućeg goriva na plinovito gorivo. Kotao je namijenjen dogrijavanju vrele vode u postojećoj toplani za daljinsko grijanje grada. Napravljen je termodinamički, hidrodinamički i aerodinamički proračun vrelovodnog kotla za slučaj loženja na teško loživo ulje i za slučaj loženja na prirodni plin.

Termodinamički proračun je napravljen prema normativnoj (CKTI) metodi. U hidrodinamičkom proračunu izračunati su padovi tlaka te brzine strujanja vode u cijevima. Aerodinamički proračun uključuje proračun dimnog trakta kotla, s izračunom pada tlaka i brzine strujanja plinova.

Tehnički crtež uključuje dispozicijski nacrt kotla s presjekom konvektivnog kanala.

Ključne riječi: vrelovodni kotao, teško loživo ulje, prirodni plin, termodinamički proračun

SUMMARY

This paper presents a numerical analysis of the conditions in the hot water boiler comparing drive on liquid fuel to gas fuel. The boiler is intended for reheating of hot water in the existing powerplant for heating purposes of town. Thermodynamic, hydrodynamic and aerodynamic calculations have been made in case of using heavy fuel oil and natural gas.

Thermodynamic analysis was made according to the normative (CKTI) method. Hydrodynamic calculation determined pressure drop and flow velocity of water in the pipes. Aerodynamic analysis includes calculations of the flue tract of boiler, estimating the pressure drop and velocity of gases.

Technical drawing includes layout of boiler with section of convective channel.

Key words: hot water boiler, heavy fuel oil, natural gas, thermodynamic analysis

1. UVOD

1.1.VRELOVODNI KOTLOVI

Vrelovodni kotlovi ne proizvode vodenu paru (voda je pod tlakom iznad tlaka zasićenja), međutim, vrelovodno kotlovsko postrojenje je veoma složeno i u velikom broju elemenata slično parnom postrojenju. [1]

Vrelovodni kotlovi koriste se za sisteme daljinskog grijanja. Vrela voda na izlazu iz kotla može imati temperaturu od 130 do 200°C i pritisak do 25 bar. Toplinska snaga vrelovodnih kotlova kreće se do preko 100 MW.

1.2.PLINSKA LOŽIŠTA I LOŽIŠTA NA TEKUĆE GORIVO [2]

Uvjeti izgaranja prirodnog plina i tekućeg goriva imaju mnogo toga zajedničkog i zbog toga, oba goriva mogu sagorijevati u ložištima iste konstrukcije. U većini slučajeva, takva ložišta se konstruiraju primarno za tekuće gorivo, s prirodnim plinom kao pomoćnim gorivom. Sličnost između tekućeg goriva i prirodnog plina pokazuju sljedeće karakteristike:

1. Oba goriva praktično ne sadrže slučajnu vlagu i stvaraju otprilike iste volumene produkata izgaranja: zbog toga puhalo (ventilator) parnog kotla mogu djelotvorno raditi bez obzira na to da li u kotlovskoj peći izgara tekuće gorivo ili prirodni plin.
2. Izgaranje tekućeg goriva i prirodnog plina odvija se u parovitom stanju (homogeni medij) i to prema zakonima razgranatih lančanih reakcija. Intenzitet izgaranja u oba slučaja određen je uvjetima miješanja, a maksimalno dozvoljeno toplinsko opterećenje po volumenu ložišta je za oba goriva blizu jedno drugom (300 kW/m^3 za tekuće gorivo, i 350 kW/m^3 za prirodni plin). Prema tome za istu količinu kotlovske pare mogu se uzeti gotovo jednake dimenzije ložišta za te dvije vrste goriva.
3. Oba goriva gotovo da i ne stvaraju pepeo prilikom izgaranja (sadržaj pepela tekućeg goriva A^d iznosi manje od 0.3% čime je izbjegnuto zašljakivanje ekranskih zidova

u ložištu i čini nepotrebnim uređaje za baratanje šljakom. S obzirom na to, ložišta za oba goriva rade se sa horizontalnim ili blago nagnutim (iskošenim) dnom s otvorima koji omogućavaju popravke.

4. Zbog toga što je gorivo u plinovitom (ili parovitom) stanju, lakše se može izmiješati sa zrakom, što osigurava praktički potpuno izgaranje kod velikog oslobođenog toplinskog toka i niskog omjera pretička zraka $\lambda = 1.02-1.05$. Za oba goriva zrak se može pregrijati na istu temperaturu ($t_{ha} = 250-300\text{ }^{\circ}\text{C}$), omogućava upotrebu kombiniranih plamenika na plin i tekuće gorivo s bliskim vrijednostima volumnog protoka zraka i gotovo istim otporom.

Plinovita goriva poznata su po tome što stvaraju plamenove niže emisivnosti nego tekuće gorivo, tako da kad se kotao promijeni s tekućeg goriva na izgaranje prirodnim plinom apsorpcija topline prostora ložišta opada, dok temperature produkata izgaranja na izlazu iz ložišta postaju veće. U otvorenim ložištima pod nazivnim opterećenjem ova temperaturna razlika može biti visoka i gotovo do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ što neizbježno mijenja temperaturne uvjete naknadnih toplinskih površina, primarno onih kod pregrijača pare.

2. PRORAČUN ZA TEKUĆE GORIVO

Zadano:

$$P = 34,89 \text{ MW}$$

$$t_u = 130^\circ\text{C}$$

$$t_i = 160^\circ\text{C}$$

$$p_r = 24,5 \text{ bar}$$

2.1. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

2.1.1. Gorivo i izgaranje

Sastav goriva:

$$c = 0,834 \quad h = 0,1 \quad o = 0,001 \quad n = 0,003 \quad s = 0,029 \quad a = 0,003 \quad w = 0,03$$

2.1.1.1. Toplinska vrijednost goriva

$$H_d = \left[339 \cdot c + 1197 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + 105 \cdot s - 25 \cdot w \right] \cdot 100 = 40457,138 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.1.1.2. Količina ugljika koja stvarno izgara

$$c_0 = c \cdot \left(1 - \frac{h_L}{100} \right) = 0,8316 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_B}$$

gubici na neizgorenim: $h_L = 1\%$

2.1.1.3. Teorijska količina kisika i zraka za izgaranje

$$V_{O_2 \min} = [1,87 \cdot c_0 + 5,55 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + 0,69 \cdot s] = 2,1294 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$$

$$V_{L \min} = \frac{V_{O_2 \min}}{0,21} = 10,1402 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$$

2.1.1.4. Stvarna količina zraka za izgaranje

$$V_L = V_{Lmin} \cdot \lambda = 10,6472 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.1.5. Teorijska količina suhih dimnih plinova

$$V_{sdpmin} = 1,87 \cdot c_0 + 0,69 \cdot s + 0,8 \cdot n + 0,79 \cdot V_{Lmin} = 9,5883 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.1.6. Stvarna količina suhih dimnih plinova

$$V_{sdp} = V_{sdpmin} + (\lambda - 1) \cdot V_{Lmin} = 10,0953 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.1.7. Volumen vlage u dimnim plinovima

$$V_{vl} = 1,24 \cdot (9 \cdot h + w) = 1,153 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.1.8. Ukupni volumen dimnih plinova

$$V_{dp} = V_{sdp} + V_{vl} = 11,2485 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.1.9. Volumni udjeli pojedinih sudionika dimnih plinova

$$V_{CO_2} = 1,87 \cdot c_0 = 1,5551 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{dp}} = 0,1383$$

$$r_{O_2} = \frac{(\lambda - 1) \cdot V_{O_2min}}{V_{dp}} = 0,009$$

$$V_{H_2O} = V_{vl} = 1,153 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{vl}}{V_{dp}} = 0,1025$$

$$V_{SO_2} = 0,69 \cdot s = 0,02 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{dp}} = 0,002$$

$$V_{N_2} = 0,8 \cdot n + 0,79 \cdot V_L = 8,4137 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{dp}} = 0,748$$

2.1.1.10. Prirast pretička zraka

V.Đurić, M.Bogner: Parni kotlovi Str.100., 2.1.2 Klasičan ozid: $\Delta\lambda = 0$

2.1.1.11. Sadržaj topline plinova izgaranja

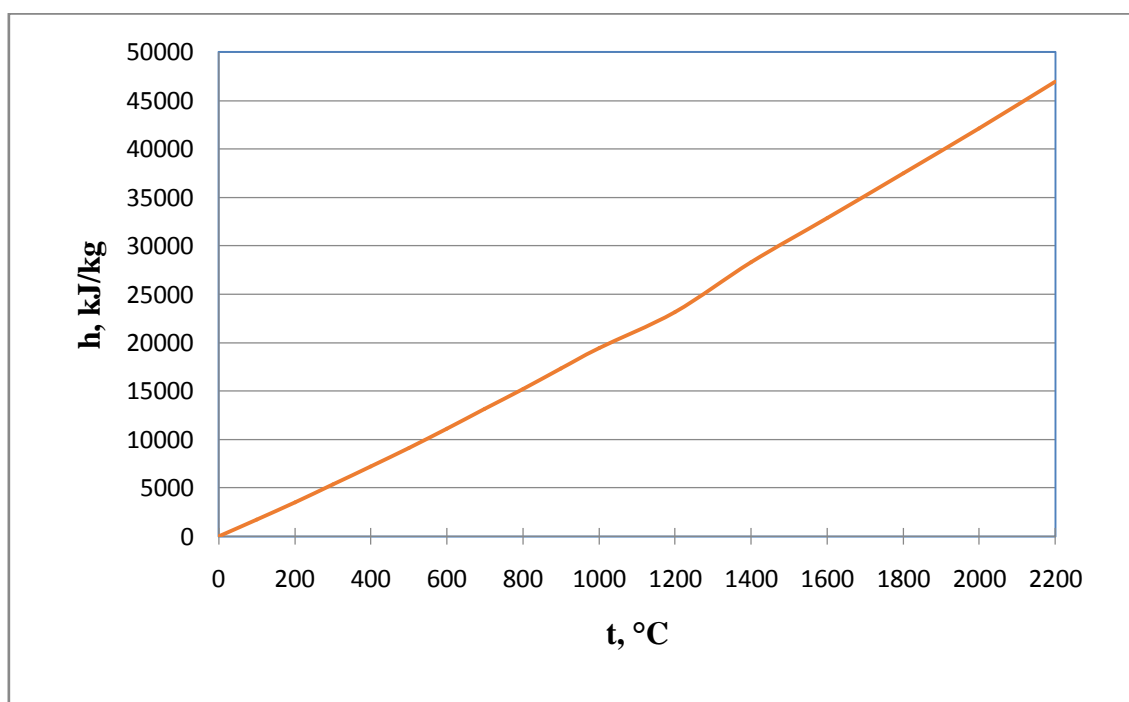
Tablica 1. Entalpije pojedinih sudionika dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi

	$h, [kJ/m^3]$				
$t, [^{\circ}C]$	CO ₂	N ₂	H ₂ O	L	SO ₂
100	170,03	130,04	150,52	132,43	181,37
200	357,47	260,75	304,46	266,36	377,69
300	558,94	393,27	462,64	406,87	587,41
400	772,05	528,37	626,35	541,77	806,8
500	994,37	666,12	795,07	684,12	1034,98
600	1244,64	807,22	968,83	829,82	1267,34
700	1462,03	951,24	1148,86	978,46	1506,41
800	1704,86	1097,36	1334,33	1129,18	1746,73
900	1952,3	1245,99	1526,09	1282,42	1992,08
1000	2203,51	1397,14	1772,87	1437,33	2237,84
1200	2716,4	1704,03	2132,34	1753,43	2733,98
1400	3238,91	2016,78	2558,97	2076,23	3223,04
1600	3768,54	2333,72	3001,94	2402,8	3726,25
1800	4304,03	2654,43	3458,72	2731,89	4237,04
2000	4844,13	2977,65	3925,54	3065,57	4768,77
2200	5386,48	3303,96	4401,98	3329,7	5314,76

$$h_{dp} = V_{CO_2} \cdot h_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot h_{SO_2} + V_{N_2} \cdot h_{N_2} + V_{H_2O} \cdot h_{H_2O} + (\lambda - 1) \cdot V_{dp} \cdot h_L$$

Tablica 2. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za tekuće gorivo

<i>t, °C</i>	<i>h, kJ/kg</i>
100	1610,0018
200	3257,8516
300	4951,6197
400	6688,6518
500	8472,4549
600	10304,6626
700	12181,5374
800	14092,093
900	16039,6993
1000	18021,1748
1200	22061,1159
1400	26189,0713
1600	30384,4588
1800	34638,1393
2000	38934,3593
2200	43316,908



Slika 1. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za tekuće gorivo

2.1.2. Toplinska bilanca generatora pare

2.1.2.1. Gubici na neizgorenim

$$h_L = 0,2 \%$$

2.1.2.2. Gubici zračenja na okolinu

$$h_Z = 1 \%$$

2.1.2.3. Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja

$$\eta_L = 1 - \frac{h_L}{100} = 0,998$$

$$\eta_L = 1 - \frac{h_Z}{100} = 0,99$$

2.1.2.4 Gubitak osjetne topline dimnih plinova

$$\text{Pretpostavka: } t_{izdp} = 177^\circ\text{C} \rightarrow h_A = 7,05 \%$$

2.1.2.5. Stupanj djelovanja generatora pare

$$\eta_K = 1 - \frac{h_L + h_Z + h_A}{100} = 0,9175$$

2.1.2.6. Veličine stanja

Radni tlak:

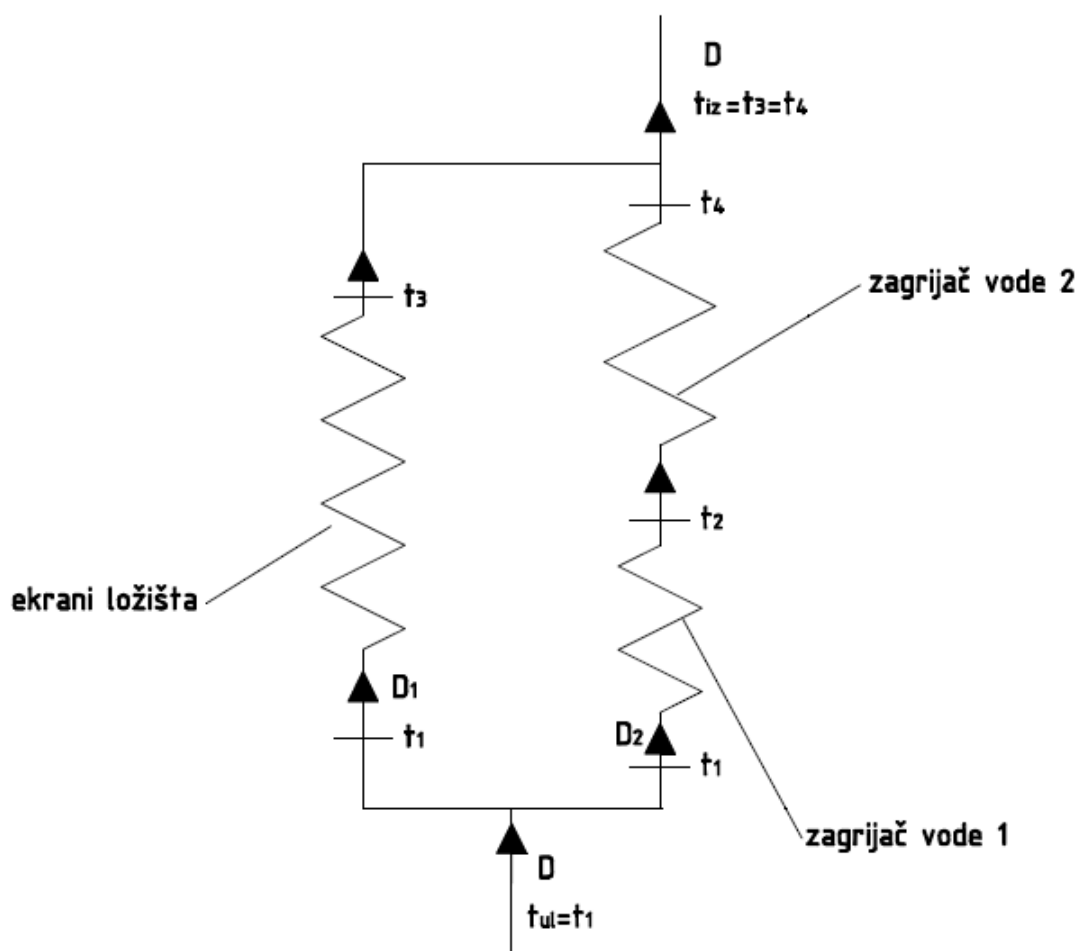
$$p_r = 24,5 \text{ bar} ; p_1 = p_r$$

$$t_{ul} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{iz} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tablica 3. Veličine stanja vode pri loženju na tekuće gorivo

stanje	t, °C	p, bar	h, kJ/kg	v, m³/kg
1	130	24,5	547,9	0,0010683
2	135,5	24,25	571,285	0,00108375
3	160	24	676,616	0,0011006
4	160	24	676,616	0,0011262



Slika 2. Shema optoka kotla

količina vode:

$$D = \frac{P}{h_{t_{iz}} - h_{t_{ul}}} = 271 \frac{kg}{s}$$

2.1.2.7. Količina goriva

$$B = \frac{P}{\eta_K \cdot H_d} = 0,9399 \frac{kg_B}{s}$$

2.1.2.8. Izmijenjena toplina u ložištu

$$Q_{el} = D_1 \cdot (h_3 - h_1) = 19693,55 \text{ kW}$$

$$q_{el} = \frac{Q_{el}}{\eta_Z \cdot B} = 2,166 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B}$$

2.1.2.9. Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 1

$$Q_{zv1} = D_2 \cdot (h_2 - h_1) = 2806,2 \text{ kW}$$

$$q_{zv1} = \frac{Q_{zv1}}{\eta_K \cdot H_d} = 3,016 \cdot 10^3 \frac{kJ}{kg_B}$$

2.1.2.10. Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 2

$$Q_{zv2} = D_2 \cdot (h_4 - h_2) = 12639,72 \text{ kW}$$

$$q_{zv2} = \frac{Q_{zv2}}{\eta_K \cdot H_d} = 1,358 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B}$$

2.1.2.11. Ukupna izmijenjena toplina

$$q = q_{el} + q_{zv1} + q_{zv2} = 3,776 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B}$$

2.1.2.12. Teoretska entalpija i temperatura izgaranja

$$h_t = \eta_L \cdot H_d + V_L \cdot h_{zr20} = 4,065 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B}$$

$$h_t = 4,065 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B} \rightarrow t_{dp} = 2078,41 \text{ °C}$$

2.1.2.13. Izlazna temperatura dimnih plinova

$$h_{iz} = h_t - q = 2890,083 \frac{kJ}{kg_B} \rightarrow t_{izdpr} = 177,69 \text{ °C}$$

Pretpostavljeno: $t_{izdp} = 177\text{ }^{\circ}\text{C}$

Provjera greške u pretpostavci:

$$\frac{t_{izdpr} - t_{izdp}}{t_{izdp}} \cdot 100 = 0,358\%$$

2.1.3 Proračun ložišta

2.1.3.1. Dimenzije ložišta

$$l_L = 4,765\text{ } m b_L = 3,99\text{ } m h_L = 6,15\text{ } m$$

2.1.3.2. Površina ekrana

$$F_L = 2 \cdot b_L \cdot h_L + 2 \cdot l_L \cdot h_L + b_L \cdot l_L = 126,699\text{ } m^2$$

$$V_L = l_L \cdot b_L \cdot h_L = 116,926\text{ } m^3$$

2.1.3.3. Stupanj ekranizacije

$$s_l = 4\text{ } mm$$

$$t_{el} = 75\text{ } mm$$

$$d_L = 57\text{ } mm$$

Očitano iz sl. 4.59. (Đurić: Parni kotlovi):

$$\text{za } \frac{t_{el}}{d_L} = 1,3158 \rightarrow \psi_L = 0,93$$

2.1.3.4. Efektivna površina

$$F_{efL} = F_L \cdot \psi_L = 117,83$$

2.1.3.5. Proračun efektivne površine po normativnoj metodi CKTI

Funkcija distribucije temperature u ložištu

Za izgaranje tekućih goriva: $M = 0,54 - 0,3 \cdot x$

Udaljenost od najnižeg dijela ložišta do sredine polja maksimalnih temperatura:

$$h_{v1} = 2,453 \text{ m}$$

Udaljenost od najnižeg dijela ložišta do sredine izlaznog otvora ložišta:

$$h_{v2} = 5,71 \text{ m}$$

Bezdimenzijski položaj temperature u ložištu:

$$x = \frac{h_{v1}}{h_{v2}} = 0,4296$$

$$M = 0,54 - 0,3 \cdot 0,4296 = 0,4111$$

Efektivni stupanj crnoće plamena

efektivna debljina sloja dimnih plinova koji zrače:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_L}{F_L} = 3,3223 \text{ m}$$

Stupanj crnoće svjetlećeg plamena:

za $s > 2,5 \text{ m}$ i izgaranje tekućeg goriva $\rightarrow \epsilon_{esv} = 0,9$

$m_L = 0,615$ (L.Kreuh: Generatori pare, tablica 4.10.)

uvjetni faktor zaprljanja: $\xi = 0,9$ (L.Kreuh: Generatori pare, str. 304.)

stvarna temperatura dimnih plinova- pretpostavka: $t_L = 1080 \text{ }^\circ\text{C}$

$$t_L = 1080 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow h_L = 19637,151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$T_L = t_L + 273,15 = 1353,15 \text{ K}$$

$$T_t = t_{dp} + 273,15 = 2351,56 \text{ K}$$

$$r_{RO} = r_{CO_2} + r_{SO_2} + r_{H_2O} = 0,2426 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$$

$$p_p = 1,033 \cdot r_{RO} = 0,2506 \text{ bar}$$

$$K_{nsv} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_p \cdot s}} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_L}{1000} \right) \cdot r_{RO} = 0,1132$$

$$\varepsilon_{nsv} = 1 - e^{-K_{nsv} \cdot s} = 0,3135$$

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{sv} \cdot m_L + \varepsilon_{nsv} \cdot (1 - m_L) = 0,6742$$

Stupanj crnoće ložišta

za izgaranje u prostoru kod potpuno ekraniziranih ložišta:

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_F + (1 - \varepsilon_F) \cdot \xi \cdot \psi_L} = 0,712$$

Efektivna površina ekrana

$$q_L = \eta_Z \cdot (h_t - h_L) = 20973,358 \frac{kJ}{kg_B}$$

Protok dimnih plinova:

$$B_{dp} = B \cdot V_{dp} = 10,5729 \frac{m^3}{s}$$

Koeficijent zračenja crnog tijela:

$$C_C = 5,672 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$F_L = \left(\frac{q_L \cdot 10^3}{C_C \cdot M \cdot \xi \cdot \varepsilon_L \cdot T_L \cdot T_t^3} \right) \cdot \left[\frac{1}{M^2} \cdot \left(\frac{T_t}{T_L} - 1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} = 117,803 m^2$$

odstupanje:

$$\frac{F_{efL} - F_L}{F_L} \cdot 100 = 0,023\%$$

2.1.4. Proračun zagrijača vode 2

2.1.4.1. Ogrijevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_z = 0,0318 \text{ m}$

debljina stijenke: $s_z = 0,003 \text{ m}$

unutarnji promjer stijenke: $d_{zu} = d_z - 2 \cdot s_z = 0,0258 \text{ m}$

duljina zagrijača vode: $L_z = 3,95 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje poprečno nastrujavaju dimni plinovi: $L_p = 7,3 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje usporedno nastrujavaju dimni plinovi: $L_u = 1,1 \text{ m}$

srednja duljina svih cijevi zagrijača: $L_{sr} = 8,4 \text{ m}$

broj cijevi: $n_z = 405$

broj cijevi u prvom redu: $N_z = 22$

broj redova: $n_r = 18$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,077 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,0375 \text{ m}$

površina zagrijača vode:

$$F_z = d_z \cdot \pi \cdot L_{sr} \cdot n_z = 339,869 \text{ m}^2$$

površina poprečnih cijevi:

$$F_p = d_z \cdot \pi \cdot L_p \cdot n_z = 295,362 \text{ m}^2$$

površina uzdužnih cijevi:

$$F_u = d_z \cdot \pi \cdot L_u \cdot n_z = 44,507 \text{ m}^2$$

2.1.4.2. Minimalni presjek

$a_z = 3,99 \text{ m}$

$b_z = 1,694 \text{ m}$

$f_{zmax} = a_z \cdot b_z - d_z \cdot L_z \cdot n_z = 3,9956 \text{ m}^2$

$$f_{zmin} = a_z \cdot b_z - \frac{d_z^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_z = 6,4374 \text{ m}^2$$

$$f_z = \frac{f_{zmax} + f_{zmin}}{2} = 5,2165 \text{ m}^2$$

2.1.4.3. Volumen dimnih plinova

$$V_{dp} = 11,2485 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$$

2.1.4.4. Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{z2ul} = T_L = 1353,15 \text{ K}$$

$$t_{z2ul} = 1080 \text{ }^\circ\text{C}$$

pretpostavljeno:

$$t_{z2iz} = 355 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z2iz} = 628,15 \text{ K}$$

$$T_{z2sr} = \frac{T_{z2ul} + T_{z2iz}}{2} = 990,65 \text{ K} \quad t_{z2sr} = 717,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

2.1.4.5. Brzina dimnih plinova

Srednja brzina dimnih plinova:

$$w_z = \frac{B_{dp} \cdot T_{z2sr}}{273 \cdot f_z} = 7,3543 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reducirana brzina dimnih plinova:

$$p_L = 1 \text{ bar}$$

$$w_{0z} = w_z \cdot 264 \cdot \frac{p_L}{T_{z2sr}} = 1,96 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2.1.4.6. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

Poprečno nastrujavanje na cijevi

šahovski raspored

$$\frac{t_p}{d_z} = 2,4214$$

$$\frac{t_u}{d_z} = 1,1792$$

faktor broja redova cijevi: C_{zz} za broj redova $n_r > 10$ $C_{zz} = 1$

srednji relativni dijagonalni korak cijevi:

$$\sigma = \sqrt{\left(0,25 \cdot \left(\frac{t_p}{d_z}\right)^2 + \left(\frac{t_z}{d_z}\right)^2\right)} = 1,69$$

$$\psi_\sigma = \frac{\frac{t_p}{d_z} - 1}{\sigma_z - 1} = 2,0597$$

za: $1,7 < \psi_\sigma \leq 4$ i $\sigma < 3C_s = 0,275 \cdot \psi_\sigma^{0,5} = 0,3947$

Tablica 4. Svojsva dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi

t, °C	v, m ² /s	λ, W/(mK)	Pr
0	11,9·10 ⁻⁶	2,28·10 ⁻²	0,74
100	20,8·10 ⁻⁶	3,13·10 ⁻²	0,7
200	31,6·10 ⁻⁶	4,01·10 ⁻²	0,67
300	43,9·10 ⁻⁶	4,84·10 ⁻²	0,65
400	57,8·10 ⁻⁶	5,7·10 ⁻²	0,64
500	73·10 ⁻⁶	6,56·10 ⁻²	0,62
600	89,4·10 ⁻⁶	7,42·10 ⁻²	0,61
700	107·10 ⁻⁶	8,27·10 ⁻²	0,6
800	126·10 ⁻⁶	9,15·10 ⁻²	0,59
900	146·10 ⁻⁶	10·10 ⁻²	0,58
1000	167·10 ⁻⁶	10,9·10 ⁻²	0,58
1100	188·10 ⁻⁶	11,7·10 ⁻²	0,57
1200	211·10 ⁻⁶	12,6·10 ⁻²	0,56
1300	234·10 ⁻⁶	13,5·10 ⁻²	0,55
1400	258·10 ⁻⁶	14,4·10 ⁻²	0,54
1500	282·10 ⁻⁶	15,4·10 ⁻²	0,53

za $t_{z2sr} = 717,5 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$v_z = 1,103 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s} \lambda_z = 0,0842 \frac{W}{mK} \quad Pr_z = 0,5982$$

$$\alpha_{kz} = C_{zz} \cdot C_{zs} \cdot \left(\frac{\lambda_z}{d_z}\right) \cdot \left(\frac{w_z \cdot d_z}{v_z}\right)^{0,6} \cdot Pr_z^{0,33} = 87,3923 \frac{W}{m^2K}$$

Uzdužno nastrujavanje na cijevi

$$\alpha_{uz} = 4,42 \cdot \frac{w_{0z}^{0,75}}{d_z^{0,25}} = 17,3383 \frac{W}{m^2K}$$

2.1.4.7. Koeficijent prijelaza topline zračenjem

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0,8$

temperatura stijenke:

$$t_{z2s} = \frac{t_2 + t_4}{2} + 30 = 177,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{z2s} = 450,9 \text{ } K$$

debljina sloja plina:

$$s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_z}{2} = 0,0413 \text{ } m$$

Koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova:

$$k_g = \frac{0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_p \cdot s}} \left(1 - 0,38 \cdot \frac{T_{z2sr}}{1000}\right) = 5,909$$

$$a = k_g \cdot r_{RO} = 1,4325$$

Stupanj crnoće dimnih plinova:

$$\varepsilon_2 = 1 - e^{(-a \cdot p_p \cdot s)} = 0,0575$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon_2 \cdot T_{z2sr}^3 \cdot \frac{\left(1 - \frac{T_{z2s}}{T_{z2sr}}\right)^4}{\left(1 - \frac{T_{z2s}}{T_{z2sr}}\right)} = 5,0857 \frac{W}{m^2K}$$

2.1.4.8. Ukupan koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{dp} = \frac{\alpha_{kz} \cdot F_p + \alpha_{uz} \cdot F_u}{F_z} + \alpha_{zr} = 83,304 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.4.9. Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

Za zagrijač vode:

$$\alpha_w = 8000 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.4.10. koeficijent prolaza topline

$$\lambda_{st} = 42 \frac{W}{mK} \xi_z = 0,95$$

$$k_{z2} = \frac{\xi_z}{\frac{1}{\alpha_{dp}} + \frac{s}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 77,865 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.4.11. Srednja logaritamska temperatura

$$t_2 = 135,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_4 = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{z2iz} = 355 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{z2ul} = 1080 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{z1} = t_{z2ul} - t_4 = 920 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{z2} = t_{z2iz} - t_2 = 219,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{zm} = \frac{\Delta t_{z1} - \Delta t_{z2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{z1}}{\Delta t_{z2}}\right)} = 488,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.1.4.12. Potrebna ogrijevna površina

$$\text{za } t_{z2iz} = 355 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h_{ziz} = 5906,987 \frac{kJ}{kg_B}$$

$$q_{z2} = h_{zul} - h_{ziz} = 13730,164 \frac{kJ}{kg_B}$$

$$F_{z2} = \frac{B \cdot q_{z2} \cdot 10^3}{\eta_z \cdot k_{z2} \cdot \Delta t_{zm}} = 342,452 m^2$$

Odstupanje:

$$\frac{F_z - F_{z2}}{F_{z2}} \cdot 100 = -0,7543 \%$$

2.1.5. Proračun zagrijača vode 1

2.1.5.1. Ogrijevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_z = 0,0318 \text{ m}$

debljina stijenke: $s_z = 0,003 \text{ m}$

unutarnji promjer stijenke: $d_{zu} = d_z - 2 \cdot s_z = 0,0258 \text{ m}$

duljina zagrijača vode: $L_z = 3,95 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje poprečno nastrujavaju dimni plinovi: $L_p = 7,3 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje usporedno nastrujavaju dimni plinovi: $L_u = 1,1 \text{ m}$

srednja duljina svih cijevi zagrijača: $L_{sr} = 8,4 \text{ m}$

broj cijevi: $n_z = 405$

broj cijevi u prvom redu: $N_z = 22$

broj redova: $n_r = 18$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,077 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,0375 \text{ m}$

površina zagrijača vode:

$$F_z = d_z \cdot \pi \cdot L_{sr} \cdot n_z = 339,869 \text{ m}^2$$

površina poprečnih cijevi:

$$F_p = d_z \cdot \pi \cdot L_p \cdot n_z = 295,362 \text{ m}^2$$

površina uzdužnih cijevi:

$$F_u = d_z \cdot \pi \cdot L_u \cdot n_z = 44,507 \text{ m}^2$$

2.1.5.2. Minimalni presjek

$a_z = 3,99 \text{ m}$

$b_z = 1,694 \text{ m}$

$f_z = a_z \cdot b_z - d_z \cdot L_z \cdot n_z = 3,9956 \text{ m}^2$

2.1.5.3. Volumen dimnih plinova

$$V_{dp} = 11,2485 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.5.4. Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{z1ul} = T_{z2iz} = 628,15 \text{ K}$$

$$t_{z1ul} = 355 \text{ °C}$$

$$T_{z1iz} = 450,15 \text{ K} \quad t_{z1iz} = 177 \text{ °C}$$

$$T_{z1sr} = \frac{T_{z1ul} + T_{z1iz}}{2} = 539,15 \text{ K}$$

$$t_{z1sr} = 266 \text{ °C}$$

2.1.5.5. Brzina dimnih plinova

Srednja brzina dimnih plinova:

$$w_z = \frac{B_{dp} \cdot T_{z1sr}}{273 \cdot f_z} = 9,6014 \frac{m}{s}$$

Reducirana brzina dimnih plinova:

$$p_L = 1 \text{ bar}$$

$$w_{0z} = w_z \cdot 264 \cdot \frac{p_L}{T_{z1sr}} = 1,96 \frac{m}{s}$$

2.1.5.6. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

Poprečno nastrujavanje na cijevi

šahovski raspored

$$\frac{t_p}{d_z} = 2,4214$$

$$\frac{t_u}{d_z} = 1,1792$$

faktor broja redova cijevi: C_{zz} za broj redova $n_r > 10$ $C_{zz} = 1$

srednji relativni dijagonalni korak cijevi:

$$\sigma = \sqrt{\left(0,25 \cdot \left(\frac{t_p}{d_z}\right)^2 + \left(\frac{t_z}{d_z}\right)^2\right)} = 1,69$$

$$\psi_{\sigma} = \frac{\frac{t_p}{d_z} - 1}{\sigma_z - 1} = 2,0597$$

$$\text{za: } 1,7 < \psi_{\sigma} \leq 4 \quad \text{i} \quad \sigma < 3C_s = 0,275 \cdot \psi_{\sigma}^{0,5} = 0,3947$$

$$\text{za } t_{z1sr} = 266 \text{ }^{\circ}\text{C} :$$

$$v_z = 3,972 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s} \lambda_z = 0,0456 \frac{W}{mK} \quad Pr_z = 0,6568$$

$$\alpha_{kz} = C_{zz} \cdot C_{zs} \cdot \left(\frac{\lambda_z}{d_z} \right) \cdot \left(\frac{w_z \cdot d_z}{v_z} \right)^{0,6} \cdot Pr_z^{0,33} = 90,0129 \frac{W}{m^2K}$$

Uzdužno nastrujavanje na cijevi

$$\alpha_{uz} = 4,42 \cdot \frac{w_{0z}^{0,75}}{d_z^{0,25}} = 17,34 \frac{W}{m^2K}$$

2.1.5.7. Koeficijent prijelaza topline zračenjem

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0,8$

temperatura stijenke:

$$t_{z1s} = \frac{t_1 + t_3}{2} + 30 = 162,75 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{z1s} = 435,9 \text{ K}$$

debljina sloja plina:

$$s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_z}{2} = 0,0413 \text{ m}$$

Koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova:

$$k_g = \frac{0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_p \cdot s}} \left(1 - 0,38 \cdot \frac{T_{z1sr}}{1000} \right) = 7,534$$

$$a = k_g \cdot r_{RO} = 1,827$$

Stupanj crnoće dimnih plinova:

$$\varepsilon_2 = 1 - e^{(-a \cdot p_p \cdot s)} = 0,0728$$

$$\alpha_{zr} = C_c \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon_2 \cdot T_{z2sr}^3 \cdot \frac{\left(1 - \frac{T_{z1s}}{T_{z1sr}}\right)^4}{\left(1 - \frac{T_{z1s}}{T_{z1sr}}\right)} = 1,8524 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.5.8. Ukupan koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{dp} = \frac{\alpha_{kz} \cdot F_p + \alpha_{uz} \cdot F_u}{F_z} + \alpha_{zr} = 80,07 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.5.9. Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

Za zagrijač vode:

$$\alpha_w = 8000 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.5.10. koeficijent prolaza topline

$$\lambda_{st} = 42 \frac{W}{mK} \xi_z = 0,95$$

$$k_{z1} = \frac{\xi_z}{\frac{1}{\alpha_{dp}} + \frac{s}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 74,89 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.5.11. Srednja logaritamska temperatura

$$t_2 = 135,5 \text{ } ^\circ C$$

$$t_1 = 130 \text{ } ^\circ C$$

$$t_{z2ul} = 355 \text{ } ^\circ C$$

$$t_{z2iz} = 177 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta t_{z1} = t_{z1ul} - t_2 = 219,5 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta t_{z2} = t_{z1iz} - t_1 = 47 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta t_{zm} = \frac{\Delta t_{z1} - \Delta t_{z2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{z1}}{\Delta t_{z2}}\right)} = 111,93 \text{ } ^\circ C$$

2.1.5.12. Potrebna ogrijevna površina

$$\text{za } t_{z1iz} = 177\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{z1iz} = 2878,846 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$q_{z1} = h_{z1ul} - h_{z1iz} = 3028,141 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$F_{z1} = \frac{B \cdot q_{z1} \cdot 10^3}{\eta_z \cdot k_{z1} \cdot \Delta t_{zm}} = 342,452 \text{ m}^2$$

Odstupanje:

$$\frac{F_z - F_{z1}}{F_{z1}} \cdot 100 = -0,912 \%$$

2.2. HIDRAULIČKI PRORAČUN

2.2.1. Proračun ekrana ložišta

2.2.1.1. Pad tlaka u ravnom dijelu cijevi

$$n_L = 226$$

$$d_u = d_L - 2 \cdot s_L = 0,049 \text{ m}$$

$$L_{sr} = \frac{[(l_L - 0,7) \cdot 2 + h_L] \cdot 104 + h_L \cdot 122}{n_L} = 9,8912 \text{ m}$$

$$v_{sr} = \frac{(v_1 + v_3)}{2} = 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{sr} = v_{sr}^{-1} = 922,126 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_L} = 0,3893 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koeficijent trenja:

Tablica 5.4 (Kreuh, Generatori pare) : $\lambda = 0,01846$

$$\Delta p_1 = \lambda \cdot \frac{L_{sr}}{d_{uL}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 260,416 \text{ Pa}$$

2.2.1.2. Pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi

$$R_L = 0,3 \text{ m} \quad \frac{R_L}{d_L} = 5,2632 \quad \zeta = 0,13 \text{ iz tablice 5.3 (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 0,26$$

$$\Delta p_2 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 46,67 \text{ Pa}$$

2.2.1.3. Pad tlaka zbog prijelaza iz cijevi u kolektor ili iz kolektora u cijevi

$$\zeta = 1,1 - 1,5 \text{ odabrano } \zeta = 1,3$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 2,6$$

$$\Delta p_3 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 466,71 \text{ Pa}$$

2.2.1.4. Ukupan pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = 773,8 \text{ Pa}$$

2.2.2. Proračun zagrijača vode 1**2.2.2.1. Pad tlaka u ravnom dijelu cijevi**

$n_z = 405$ - cijevi zagrijača

$n_p = 55$ - prestrujne cijevi

$$d_{zu} = 0,0258 \text{ m}$$

$$d_{pu} = 0,0681 \text{ m}$$

$$L_{srz} = 8,4 \text{ m}$$

$$L_{srp} = 2,9 \text{ m}$$

$$v_{sr} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} = 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{sr} = v_{sr}^{-1} = 929,346 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{srz} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,6098 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$w_{srz} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,6446 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koeficijent trenja:

Tablica 5.4 (Kreuh, Generatori pare) : $\lambda_z = 0,0215$ $\lambda_p = 0,0179$

$$\Delta p_1 = \lambda_z \cdot \frac{L_{srz}}{d_{zu}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} + \lambda_p \cdot \frac{L_{srp}}{d_{pu}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 1536,87 \text{ Pa}$$

2.2.2.2. Pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi

$$R_L = 0,08 \text{ m} \quad \frac{R_z}{d_z} = 2,5157 \quad \zeta = 0,2 \quad \text{tablica 5.3 (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 0,4$$

$$\Delta p_2 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 113,35 \text{ Pa}$$

2.2.2.3. Pad tlaka zbog prijelaza iz cijevi u kolektor ili iz kolektora u cijevi

$$\zeta = 1,1 - 1,5 \quad \text{odabrano} \quad \zeta = 1,3$$

$$\sum \zeta = 19 \cdot \zeta = 24,7$$

$$\Delta p_3 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 4468,63 \text{ Pa}$$

2.2.2.4. Ukupan pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = 5938,65 \text{ Pa}$$

2.2.3. Proračun zagrijača vode 2

2.2.3.1. Pad tlaka u ravnom dijelu cijevi

$$n_z = 405 \text{ - cijevi zagrijača}$$

$$n_p = 55 \quad \text{- prestrujne cijevi}$$

$$d_{zu} = 0,0258 \text{ m}$$

$$d_{pu} = 0,0681 \text{ m}$$

$$L_{srz} = 8,4 \text{ m}$$

$$L_{srp} = 2,9 \text{ m}$$

$$v_{sr} = \frac{(v_2 + v_4)}{2} = 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{sr} = v_{sr}^{-1} = 905 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{srz} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,6263 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$w_{srz} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,6619 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koeficijent trenja:

Tablica 5.4 (Kreuh, Generatori pare) : $\lambda_z = 0,0215$ $\lambda_p = 0,0179$

$$\Delta p_1 = \lambda_z \cdot \frac{L_{srz}}{d_{zu}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} + \lambda_p \cdot \frac{L_{srp}}{d_{pu}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 1394,38 \text{ Pa}$$

2.2.3.2. Pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi

$$R_L = 0,08 \text{ m} \quad \frac{R_z}{d_z} = 2,5157 \quad \zeta = 0,2 \quad \text{tablica 5.3 (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\sum \zeta = 19 \cdot \zeta = 0,4$$

$$\Delta p_2 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 113,4 \text{ Pa}$$

2.2.3.3. Pad tlaka zbog prijelaza iz cijevi u kolektor ili iz kolektora u cijevi

$$\zeta = 1,1 - 1,5 \quad \text{odabrano} \quad \zeta = 1,3$$

$$\sum \zeta = 19 \cdot \zeta = 24,7$$

$$\Delta p_3 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 4351,36 \text{ Pa}$$

2.2.3.4. Ukupan pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = 5858,1 \text{ Pa}$$

3. PRORAČUN ZA PLINOVITO GORIVO

Zadano:

$$P = 34,89 \text{ MW}$$

$$t_u = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_i = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_r = 24,5 \text{ bar}$$

3.1. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

3.1.1. Gorivo i izgaranje

Sastav goriva:

$$CO_2 = 0,75 \% \quad n_{CO_2} = 0,0075$$

$$CH_4 = 86,48 \% \quad n_{CH_4} = 0,8648$$

$$C_2H_6 = 9,51 \% \quad n_{C_2H_6} = 0,0951$$

$$C_3H_8 = 3,01 \% \quad n_{C_3H_8} = 0,0301$$

$$C_4H_{10} = 0,21 \% \quad n_{C_4H_{10}} = 0,0021$$

$$C_5H_{12} = 0,03 \% \quad n_{C_5H_{12}} = 0,0003$$

3.1.1.1. Toplinska vrijednost goriva

$$H_d = 358 \cdot CH_4 + 634 \cdot C_2H_6 + 936 \cdot C_3H_8 + 1214 \cdot C_4H_{10} + 1460 \cdot C_5H_{12}$$

$$H_d = 40114,64 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

3.1.1.2. Količina ugljika koja stvarno izgara

za plin: $h_L = 0$ odnosno $c_0 = c$

3.1.1.3. Teorijska količina kisika i zraka za izgaranje

$$V_{O_2 \min} = 2 \cdot n_{CH_4} + 3,5 \cdot n_{C_2H_6} + 5 \cdot n_{C_3H_8} + 6,5 \cdot n_{C_4H_{10}} + 8 \cdot n_{C_5H_{12}} = 2,23 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

$$V_{Lmin} = \frac{V_{O_2min}}{0,21} = 10,6167 \frac{m^3}{m^3}$$

3.1.1.4. Stvarna količina zraka za izgaranje

$$V_L = V_{Lmin} \cdot \lambda = 11,1457 \frac{m^3}{m^3}$$

3.1.1.5. Teorijska količina suhih dimnih plinova

$$V_{sdpmin} = n_{CO_2} + n_{CH_4} + 2 \cdot n_{C_2H_6} + 3 \cdot n_{C_3H_8} + 4 \cdot n_{C_4H_{10}} + 5 \cdot n_{C_5H_{12}} + 0,79 \cdot V_{Lmin}$$

$$V_{sdpmin} = 9,5481 \frac{m^3}{m^3}$$

3.1.1.6. Stvarna količina suhih dimnih plinova

$$V_{sdp} = V_{sdpmin} + (\lambda - 1) \cdot V_{Lmin} = 10,0789 \frac{m^3}{m^3}$$

3.1.1.7. Volumen vlage u dimnim plinovima

$$V_{vl} = 2 \cdot n_{CH_4} + 3 \cdot n_{C_2H_6} + 4 \cdot n_{C_3H_8} + 5 \cdot n_{C_4H_{10}} + 6 \cdot n_{C_5H_{12}} = 2,148 \frac{m^3}{m^3}$$

3.1.1.8. Ukupni volumen dimnih plinova

$$V_{dp} = V_{sdp} + V_{vl} = 11,2485 \frac{m^3}{m^3}$$

3.1.1.9. Volumni udjeli pojedinih sudionika dimnih plinova

$$V_{CO_2} = n_{CO_2} + n_{CH_4} + 2 \cdot n_{C_2H_6} + 3 \cdot n_{C_3H_8} + 4 \cdot n_{C_4H_{10}} + 5 \cdot n_{C_5H_{12}} = 1,1609 \frac{m^3}{m^3}$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{dp}} = 0,0949$$

$$r_{O_2} = \frac{(\lambda - 1) \cdot V_{O_2min}}{V_{dp}} = 0,009$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{vl}}{V_{dp}} = 0,1757$$

$$r_{N_2} = \frac{0,79 \cdot V_L}{V_{dp}} = 0,7203$$

3.1.1.10. Prirast pretička zraka

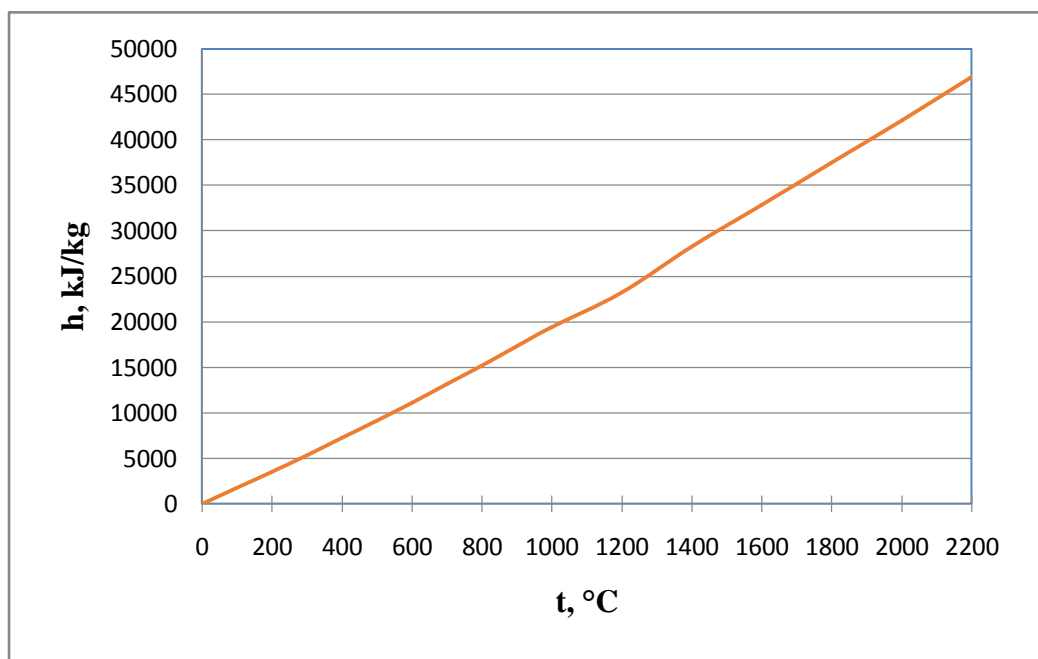
Đurić V., Bogner M.: Parni kotlovi, str.100., 3.2. Klasičan ozid: $\Delta\lambda = 0$

3.1.1.11. Sadržaj topline plinova izgaranja

$$h_{dp} = V_{CO_2} \cdot h_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot h_{SO_2} + V_{N_2} \cdot h_{N_2} + V_{H_2O} \cdot h_{H_2O} + (\lambda - 1) \cdot V_{dp} \cdot h_L$$

Tablica 5. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za plinovito gorivo

$t, [^{\circ}C]$	$h, [kJ/m^3]$
100	1746,8657
200	3528,1063
300	5354,7042
400	7225,9846
500	9146,6103
600	11118,8408
700	13140,3174
800	15199,5596
900	17301,3095
1000	19441,4324
1200	23182,2685
1400	28286,8345
1600	32834,9685
1800	37472,3104
2000	42152,4805
2200	46930,4944



Slika 3. Entalpija dimnih plinova u ovisnosti o temperaturi za plinovito gorivo

3.1.2. Toplinska bilanca generatora pare

3.1.2.1. Gubici na neizgorenom

$$h_L = 0 \%$$

3.1.2.2. Gubici zračenja na okolinu

$$h_Z = 1 \%$$

3.1.2.3. Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja

$$\eta_L = 1 - \frac{h_L}{100} = 1$$

$$\eta_L = 1 - \frac{h_z}{100} = 0,99$$

3.1.2.4. Gubitak osjetne topline dimnih plinova

$$\text{Pretpostavka: } t_{izdp} = 185^\circ\text{C} \rightarrow h_A = 8 \%$$

3.1.2.5. Stupanj djelovanja generatora pare

$$\eta_K = 1 - \frac{h_L + h_Z + h_A}{100} = 0,91$$

3.1.2.6. Veličine stanja

Radni tlak:

$$p_r = 24,5 \text{ bar} ; p_1 = p_r$$

$$t_{ul} = 130^\circ\text{C}$$

$$t_{iz} = 160^\circ\text{C}$$

Tablica 6. Veličine stanja vode pri loženju na plinovito gorivo

stanje	t, °C	p, bar	h, kJ/kg	v, m ³ /kg
1	130	24,5	547,9	0,0010683
2	135	24,25	569,15	0,0010734
3	160	24	676,616	0,0011006
4	160	24	676,616	0,0011262

količina vode:

$$D = \frac{P}{h_{t_{iz}} - h_{t_{ul}}} = 271 \frac{kg}{s}$$

3.1.2.7. Količina goriva

$$B = \frac{P}{\eta_K \cdot H_d} = 0,9399 \frac{m^3}{s}$$

3.1.2.8. Izmijenjena toplina u ložištu

$$Q_{el} = D_1 \cdot (h_3 - h_1) = 14030,044 kW$$

$$q_{el} = \frac{Q_{el}}{\eta_Z \cdot B} = 1,483 \cdot 10^4 \frac{kJ}{m^3}$$

3.1.2.9. Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 1

$$Q_{zv1} = D_2 \cdot (h_2 - h_1) = 3485 kW$$

$$q_{zv1} = \frac{Q_{zv1}}{\eta_K \cdot H_d} = 3,683 \cdot 10^3 \frac{kJ}{m^3}$$

2.1.2.10. Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 2

$$Q_{zv2} = D_2 \cdot (h_4 - h_2) = 17624,424 kW$$

$$q_{zv2} = \frac{Q_{zv2}}{\eta_K \cdot H_d} = 1,863 \cdot 10^4 \frac{kJ}{m^3}$$

2.1.2.11. Ukupna izmijenjena toplina

$$q = q_{el} + q_{zv1} + q_{zv2} = 3,714 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B}$$

3.1.2.12. Teoretska entalpija i temperatura izgaranja

$$h_t = \eta_L \cdot H_d + V_L \cdot h_{zr20} = 4,04 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B}$$

$$h_t = 4,065 \cdot 10^4 \frac{kJ}{kg_B} \rightarrow t_{dp} = 1925,28 ^\circ C$$

3.1.2.12. Izlazna temperatura dimnih plinova

$$h_{iz} = h_t - q = 3267,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izdpr} = 185,36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pretpostavljeno: $t_{izdp} = 183 \text{ } ^\circ\text{C}$

Provjera greške u pretpostavci:

$$\frac{t_{izdpr} - t_{izdp}}{t_{izdp}} \cdot 100 = 1,287 \%$$

3.1.3. Proračun ložišta

3.1.3.1. Dimenzije ložišta

$$l_L = 4,765 \text{ m} \quad b_L = 3,99 \text{ m} \quad h_L = 6,15 \text{ m}$$

3.1.3.2. Površina ekrana

$$F_L = 2 \cdot b_L \cdot h_L + 2 \cdot l_L \cdot h_L + b_L \cdot l_L = 126,699 \text{ m}^2$$

$$V_L = l_L \cdot b_L \cdot h_L = 116,926 \text{ m}^3$$

3.1.3.3. Stupanj ekranizacije

$$s_l = 4 \text{ mm}$$

$$t_{el} = 75 \text{ mm}$$

$$d_L = 57 \text{ mm}$$

Očitano iz sl. 4.59. (Đurić: Parni kotlovi):

$$\text{za } \frac{t_{el}}{d_L} = 1,3158 \rightarrow \psi_L = 0,93$$

3.1.3.4. Efektivna površina

$$F_{efL} = F_L \cdot \psi_L = 117,83 \text{ m}^2$$

3.1.3.5. Proračun efektivne površine po normativnoj metodi CKTI

Funkcija distribucije temperature u ložištu

Za izgaranje plinskih goriva: $M = 0,52 - 0,3 \cdot x$

Udaljenost od najnižeg dijela ložišta do sredine polja maksimalnih temperatura:

$$h_{v1} = 2,453 \text{ m}$$

Udaljenost od najnižeg dijela ložišta do sredine izlaznog otvora ložišta:

$$h_{v2} = 5,71 \text{ m}$$

Bezdimenzijski položaj temperature u ložištu:

$$x = \frac{h_{v1}}{h_{v2}} = 0,4296$$

$$M = 0,52 - 0,3 \cdot 0,4296 = 0,3911$$

Efektivni stupanj crnoće plamena

Efektivna debljina sloja dimnih plinova koji zrače:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_L}{F_L} = 3,3223 \text{ m}$$

Uvjetni faktor zaprljanja: $\xi = 1$ (L.Kreuh: Generatori pare, str. 304.)

Stvarna temperatura dimnih plinova- pretpostavka: $t_L = 1280 \text{ }^\circ\text{C}$

$$t_L = 1280 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow h_L = 25602,095 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$T_L = t_L + 273,15 = 1553,15 \text{ K}$$

$$T_t = t_{dp} + 273,15 = 2198,43 \text{ K}$$

$$m_L = 0,05 \quad - \text{ tablica 4.10. (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\varepsilon_L = 0,3933 \quad - \text{ iteracijom prema poglavlju 3.1.3.5.3.}$$

$$m_C = 0,7514 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}_B}$$

$$m_H = 0,2411 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}_B}$$

$$\frac{m_C}{m_H} = 3,1162$$

$$K_C = 0,03 \cdot (2 - \varepsilon_L) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{T_L}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{m_C}{m_H} = 0,2982$$

$$r_{RO} = r_{CO_2} + r_{SO_2} + r_{H_2O} = 0,2426 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$p_p = 1,033 \cdot r_{RO} = 0,2796 \text{ bar}$$

$$K_{nsv} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_p \cdot s}} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_L}{1000} \right) \cdot r_{RO} = 0,1152$$

$$\varepsilon_{nsv} = 1 - e^{-K_{nsv} \cdot s} = 0,3181$$

$$K_{sv} = K_{nsv} + K_c = 0,4134$$

$$\varepsilon_{sv} = 1 - e^{-K_{sv} \cdot s} = 0,7468$$

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{sv} \cdot m_L + \varepsilon_{nsv} \cdot (1 - m_L) = 0,3395$$

Stupanj crnoće ložišta

Za izgaranje u prostoru kod potpuno ekraniziranih ložišta:

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_F + (1 - \varepsilon_F) \cdot \xi \cdot \psi_L} = 0,3559$$

Efektivna površina ekrana

$$q_L = \eta_Z \cdot (h_t - h_L) = 14801,845 \frac{kJ}{m^3}$$

Protok dimnih plinova:

$$B_{dp} = B \cdot V_{dp} = 11,6862 \frac{m^3}{s}$$

$$F_L = \left(\frac{q_L \cdot 10^3}{C_C \cdot M \cdot \xi \cdot \varepsilon_L \cdot T_L \cdot T_t^3} \right) \cdot \left[\frac{1}{M^2} \cdot \left(\frac{T_t}{T_L} - 1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} = 118,253 \text{ m}^2$$

odstupanje:

$$\frac{F_{efL} - F_L}{F_L} \cdot 100 = -0,3577\%$$

3.1.4. Proračun zagrijača vode 2

3.1.4.1. Ogrijevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_z = 0,0318 \text{ m}$

debljina stijenke: $s_z = 0,003 \text{ m}$

unutarnji promjer stijenke: $d_{zu} = d_z - 2 \cdot s_z = 0,0258 \text{ m}$

duljina zagrijača vode: $L_z = 3,95 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje poprečno nastrujavaju dimni plinovi: $L_p = 7,3 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje usporedno nastrujavaju dimni plinovi: $L_u = 1,1 \text{ m}$

srednja duljina svih cijevi zagrijača: $L_{sr} = 8,4 \text{ m}$

broj cijevi: $n_z = 405$

broj cijevi u prvom redu: $N_z = 22$

broj redova: $n_r = 18$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,077 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,0375 \text{ m}$

površina zagrijača vode:

$$F_z = d_z \cdot \pi \cdot L_{sr} \cdot n_z = 339,869 \text{ m}^2$$

površina poprečnih cijevi:

$$F_p = d_z \cdot \pi \cdot L_p \cdot n_z = 295,362 \text{ m}^2$$

površina uzdužnih cijevi:

$$F_u = d_z \cdot \pi \cdot L_u \cdot n_z = 44,507 \text{ m}^2$$

3.1.4.2. Minimalni presjek

$$a_z = 3,99 \text{ m}$$

$$b_z = 1,694 \text{ m}$$

$$f_{zmax} = a_z \cdot b_z - d_z \cdot L_z \cdot n_z = 3,9956 \text{ m}^2$$

$$f_{zmin} = a_z \cdot b_z - \frac{d_z^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_z = 6,4374 \text{ m}^2$$

$$f_z = \frac{f_{zmax} + f_{zmin}}{2} = 5,2165 \text{ m}^2$$

3.1.4.3. Volumen dimnih plinova

$$V_{dp} = 12,2269 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

3.1.4.4. Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{z2ul} = T_L = 1553,15 \text{ K}$$

$$t_{z2ul} = 1280 \text{ }^\circ\text{C}$$

pretpostavljeno:

$$t_{z2iz} = 390 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z2iz} = 663 \text{ K}$$

$$T_{z2sr} = \frac{T_{z2ul} + T_{z2iz}}{2} = 1108,075 \text{ K}$$

$$t_{z2sr} = 835,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.1.4.5. Brzina dimnih plinova

Srednja brzina dimnih plinova:

$$w_z = \frac{B_{dp} \cdot T_{z2sr}}{273 \cdot f_z} = 9,0928 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reducirana brzina dimnih plinova:

$$p_L = 1 \text{ bar}$$

$$w_{0z} = w_z \cdot 264 \cdot \frac{p_L}{T_{z2sr}} = 2,1664 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.1.4.6. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

Poprečno nastrujavanje na cijevi

šahovski raspored

$$\frac{t_p}{d_z} = 2,4214$$

$$\frac{t_u}{d_z} = 1,1792$$

faktor broja redova cijevi: C_{zz} za broj redova $n_r > 10$ $C_{zz} = 1$

srednji relativni dijagonalni korak cijevi:

$$\sigma = \sqrt{\left(0,25 \cdot \left(\frac{t_p}{d_z}\right)^2 + \left(\frac{t_z}{d_z}\right)^2\right)} = 1,69$$

$$\psi_\sigma = \frac{\frac{t_p}{d_z} - 1}{\sigma_z - 1} = 2,0597$$

$$\text{za: } 1,7 < \psi_\sigma \leq 4 \quad \text{i} \quad \sigma < 3C_s = 0,275 \cdot \psi_\sigma^{0,5} = 0,3947$$

za $t_{z2sr} = 835,05 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$v_z = 1,33 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s} \lambda_z = 0,0945 \frac{W}{mK} \quad Pr_z = 0,5865$$

$$\alpha_{kz} = C_{zz} \cdot C_{zs} \cdot \left(\frac{\lambda_z}{d_z}\right) \cdot \left(\frac{w_z \cdot d_z}{v_z}\right)^{0,6} \cdot Pr_z^{0,33} = 98,86 \frac{W}{m^2K}$$

Uzdužno nastrujavanje na cijevi

$$\alpha_{uz} = 4,42 \cdot \frac{w_{0z}^{0,75}}{d_z^{0,25}} = 18,69 \frac{W}{m^2K}$$

3.1.4.7. Koeficijent prijelaza topline zračenjem

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0,8$

temperatura stijenke:

$$t_{z2s} = \frac{t_2 + t_4}{2} + 30 = 187,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{z2s} = 460,65 \text{ K}$$

debljina sloja plina:

$$s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_z}{2} = 0,0413 \text{ m}$$

Koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova:

$$k_g = \frac{0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_p \cdot s}} \left(1 - 0,38 \cdot \frac{T_{z2sr}}{1000}\right) = 5,822$$

$$a = k_g \cdot r_{RO} = 1,5754$$

Stupanj crnoće dimnih plinova:

$$\varepsilon_2 = 1 - e^{(-a \cdot p_p \cdot s)} = 0,0631$$

$$\alpha_{zr} = C_c \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon_2 \cdot T_{z2sr}^3 \cdot \frac{\left(1 - \frac{T_{z2s}}{T_{z2sr}}\right)^4}{\left(1 - \frac{T_{z2s}}{T_{z2sr}}\right)} = 7,271 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.4.8. Ukupan koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{dp} = \frac{\alpha_{kz} \cdot F_p + \alpha_{uz} \cdot F_u}{F_z} + \alpha_{zr} = 95,632 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.4.9. Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

Za zagrijač vode:

$$\alpha_w = 8000 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.4.10. koeficijent prolaza topline

$$\lambda_{st} = 42 \frac{W}{mK} \xi_z = 0,95$$

$$k_{z2} = \frac{\xi_z}{\frac{1}{\alpha_{dp}} + \frac{s}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 89,175 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.4.11. Srednja logaritamska temperatura

$$t_2 = 135,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_4 = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{z2iz} = 390 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{z2ul} = 1280 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{z1} = t_{z2ul} - t_4 = 1120,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{z2} = t_{z2iz} - t_2 = 255 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{zm} = \frac{\Delta t_{z1} - \Delta t_{z2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{z1}}{\Delta t_{z2}}\right)} = 584,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.1.4.12. Potrebna ogrijevna površina

$$\text{za } t_{z2iz} = 390 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{ziz} = 7038,857 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$q_{z2} = h_{zul} - h_{ziz} = 18563,238 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$F_{z2} = \frac{B \cdot q_{z2} \cdot 10^3}{\eta_z \cdot k_{z2} \cdot \Delta t_{zm}} = 343,785 \text{ m}^2$$

Odstupanje:

$$\frac{F_z - F_{z2}}{F_{z2}} \cdot 100 = -1,14 \%$$

3.1.5. Proračun zagrijača vode 1**3.1.5.1. Ogrijevna površina**

vanjski promjer cijevi: $d_z = 0,0318 \text{ m}$

debljina stijenke: $s_z = 0,003 \text{ m}$

unutarnji promjer stijenke: $d_{zu} = d_z - 2 \cdot s_z = 0,0258 \text{ m}$

duljina zagrijača vode: $L_z = 3,95 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje poprečno nastrujavaju dimni plinovi: $L_p = 7,3 \text{ m}$

srednja duljina cijevi na koje usporedno nastrujavaju dimni plinovi: $L_u = 1,1 \text{ m}$

srednja duljina svih cijevi zagrijača: $L_{sr} = 8,4 \text{ m}$

broj cijevi: $n_z = 405$

broj cijevi u prvom redu: $N_z = 22$

broj redova: $n_r = 18$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,077 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,0375 \text{ m}$

površina zagrijača vode:

$$F_z = d_z \cdot \pi \cdot L_{sr} \cdot n_z = 339,869 \text{ m}^2$$

površina poprečnih cijevi:

$$F_p = d_z \cdot \pi \cdot L_p \cdot n_z = 295,362 \text{ m}^2$$

površina uzdužnih cijevi:

$$F_u = d_z \cdot \pi \cdot L_u \cdot n_z = 44,507 \text{ m}^2$$

3.1.5.2. Minimalni presjek

$$a_z = 3,99 \text{ m}$$

$$b_z = 1,694 \text{ m}$$

$$f_z = a_z \cdot b_z - d_z \cdot L_z \cdot n_z = 3,9956 \text{ m}^2$$

3.1.5.3. Volumen dimnih plinova

$$V_{dp} = 12,2269 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

3.1.5.4. Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{z1ul} = T_{z2iz} = 663,15 \text{ K}$$

$$t_{z1ul} = 390 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z1iz} = 456,15 \text{ K} \quad t_{z1iz} = 183 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z1sr} = \frac{T_{z1ul} + T_{z1iz}}{2} = 559,65 \text{ K} \quad t_{z1sr} = 286,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.1.5.5. Brzina dimnih plinova

Srednja brzina dimnih plinova:

$$w_z = \frac{B_{dp} \cdot T_{z1sr}}{273 \cdot f_z} = 11,871 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reducirana brzina dimnih plinova:

$$p_L = 1 \text{ bar}$$

$$w_{0z} = w_z \cdot 264 \cdot \frac{p_L}{T_{z1sr}} = 2,1664 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.1.5.6. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

Poprečno nastrujavanje na cijevi

šahovski raspored

$$\frac{t_p}{d_z} = 2,4214 \quad \frac{t_u}{d_z} = 1,1792$$

faktor broja redova cijevi: C_{zz} za broj redova $n_r > 10$ $C_{zz} = 1$

srednji relativni dijagonalni korak cijevi:

$$\sigma = \sqrt{\left(0,25 \cdot \left(\frac{t_p}{d_z}\right)^2 + \left(\frac{t_z}{d_z}\right)^2\right)} = 1,69$$

$$\psi_\sigma = \frac{\frac{t_p}{d_z} - 1}{\sigma - 1} = 2,0597$$

$$\text{za: } 1,7 < \psi_\sigma \leq 4 \quad \text{i} \quad \sigma < 3C_s = 0,275 \cdot \psi_\sigma^{0,5} = 0,3947$$

za $t_{z1sr} = 286,5 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$v_z = 4,224 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s} \lambda_z = 0,0473 \frac{W}{mK} \quad Pr_z = 0,6527$$

$$\alpha_{kz} = C_{zz} \cdot C_{zs} \cdot \left(\frac{\lambda_z}{d_z}\right) \cdot \left(\frac{w_z \cdot d_z}{v_z}\right)^{0,6} \cdot Pr_z^{0,33} = 102 \frac{W}{m^2K}$$

Uzdužno nastrujavanje na cijevi

$$\alpha_{uz} = 4,42 \cdot \frac{w_{0z}^{0,75}}{d_z^{0,25}} = 18,69 \frac{W}{m^2K}$$

3.1.5.7. Koeficijent prijelaza topline zračenjem

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0,8$

temperatura stijenke:

$$t_{z1s} = \frac{t_1 + t_3}{2} + 30 = 162,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_s = 435,9 \text{ K}$$

debljina sloja plina:

$$s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_z}{2} = 0,0413 \text{ m}$$

Koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova:

$$k_g = \frac{0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_p \cdot s}} \left(1 - 0,38 \cdot \frac{T_{z1sr}}{1000} \right) = 7,918$$

$$a = k_g \cdot r_{RO} = 2,1426$$

Stupanj crnoće dimnih plinova:

$$\varepsilon_2 = 1 - e^{(-a \cdot p_p \cdot s)} = 0,0848$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon_2 \cdot T_{z2sr}^3 \cdot \frac{\left(1 - \frac{T_{z1s}}{T_{z1sr}} \right)^4}{\left(1 - \frac{T_{z1s}}{T_{z1sr}} \right)} = 2,304 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.5.8. Ukupan koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{dp} = \frac{\alpha_{kz} \cdot F_p + \alpha_{uz} \cdot F_u}{F_z} + \alpha_{zr} = 90,66 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.5.9. Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

Za zagrijač vode:

$$\alpha_w = 8000 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.5.10. koeficijent prolaza topline

$$\lambda_{st} = 42 \frac{W}{mK} \xi_z = 0,95$$

$$k_{z1} = \frac{\xi_z}{\frac{1}{\alpha_{dp}} + \frac{s}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 84,623 \frac{W}{m^2 K}$$

3.1.5.11. Srednja logaritamska temperatura

$$t_2 = 135,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_1 = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{z2ul} = 390 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{z2iz} = 183 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{z1} = t_{z1ul} - t_2 = 255 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{z2} = t_{z1iz} - t_1 = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{zm} = \frac{\Delta t_{z1} - \Delta t_{z2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{z1}}{\Delta t_{z2}}\right)} = 128,58 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.1.5.12. Potrebna ogrijevna površina

$$\text{za } t_{z1iz} = 183 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{z1iz} = 3225,295 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$q_{z1} = h_{z1ul} - h_{z1iz} = 3813,561 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$F_{z1} = \frac{B \cdot q_{z1} \cdot 10^3}{\eta_z \cdot k_{z1} \cdot \Delta t_{zm}} = 338,361 \text{ m}^2$$

Odstupanje:

$$\frac{F_z - F_{z1}}{F_{z1}} \cdot 100 = 0,4456 \%$$

3.2. HIDRAULIČKI PRORAČUN

3.2.1. Proračun ekrana ložišta

3.2.1.1. Pad tlaka u ravnom dijelu cijevi

$$n_L = 226$$

$$d_u = d_L - 2 \cdot s_L = 0,049 \text{ m}$$

$$L_{sr} = \frac{[(l_L - 0,7) \cdot 2 + h_L] \cdot 104 + h_L \cdot 122}{n_L} = 9,8912 \text{ m}$$

$$v_{sr} = \frac{(v_1 + v_3)}{2} = 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{sr} = v_{sr}^{-1} = 922,126 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_L} = 0,2774 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koeficijent trenja:

Tablica 5.4 (Kreuh, Generatori pare) : $\lambda = 0,01846$

$$\Delta p_1 = \lambda \cdot \frac{L_{sr}}{d_{uL}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 132,17 \text{ Pa}$$

3.2.1.2. Pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi

$$R_L = 0,3 \text{ m} \quad \frac{R_L}{d_L} = 5,2632 \quad \zeta = 0,13 \text{ iz tablice 5.3 (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 0,26$$

$$\Delta p_2 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 33,25 \text{ Pa}$$

3.2.1.3. Pad tlaka zbog prijelaza iz cijevi u kolektor ili iz kolektora u cijevi

$$\zeta = 1,1 - 1,5 \text{ odabrano } \zeta = 1,3$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 2,6$$

$$\Delta p_3 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 332,5 \text{ Pa}$$

3.2.1.4. Ukupan pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = 497,9 \text{ Pa}$$

3.2.2. Proračun zagrijača vode 1**3.2.2.1. Pad tlaka u ravnom dijelu cijevi**

$n_z = 405$ - cijevi zagrijača

$n_p = 55$ - prestrujne cijevi

$$d_{zu} = 0,0258 \text{ m}$$

$$d_{pu} = 0,0681 \text{ m}$$

$$L_{srz} = 8,4 \text{ m}$$

$$L_{srp} = 2,9 \text{ m}$$

$$v_{sr} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} = 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{sr} = v_{sr}^{-1} = 929,346 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{srz} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,8335 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$w_{srp} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{pu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,8809 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koeficijent trenja:

Tablica 5.4 (Kreuh, Generatori pare) : $\lambda_z = 0,0215$ $\lambda_p = 0,0179$

$$\Delta p_1 = \lambda_z \cdot \frac{L_{srz}}{d_{zu}} \cdot \frac{w_{srz}^2}{2} \cdot \rho_{sr} + \lambda_p \cdot \frac{L_{srp}}{d_{pu}} \cdot \frac{w_{srp}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 2534,33 \text{ Pa}$$

3.2.2.2. Pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi

$$R_L = 0,08 \text{ m} \quad \frac{R_z}{d_z} = 2,5157 \quad \zeta = 0,2 \quad \text{tablica 5.3 (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 0,4$$

$$\Delta p_2 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{srz}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 154,9 \text{ Pa}$$

3.2.2.3. Pad tlaka zbog prijelaza iz cijevi u kolektor ili iz kolektora u cijevi

$$\zeta = 1,1 - 1,5 \quad \text{odabrano} \quad \zeta = 1,3$$

$$\sum \zeta = 19 \cdot \zeta = 24,7$$

$$\Delta p_3 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{srp}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 8906,31 \text{ Pa}$$

3.2.2.4. Ukupan pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = 11595,54 \text{ Pa}$$

3.2.3. Proračun zagrijača vode 2

3.2.3.1. Pad tlaka u ravnom dijelu cijevi

$$n_z = 405 \text{ - cijevi zagrijača}$$

$$n_p = 55 \quad \text{- prestrujne cijevi}$$

$$d_{zu} = 0,0258 \text{ m}$$

$$d_{pu} = 0,0681 \text{ m}$$

$$L_{srz} = 8,4 \text{ m}$$

$$L_{srp} = 2,9 \text{ m}$$

$$v_{sr} = \frac{(v_2 + v_4)}{2} = 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{sr} = v_{sr}^{-1} = 905 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{srz} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zu}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,8559 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$w_{srp} = \frac{D_2 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_{zp}^2 \cdot \pi \cdot n_z} = 0,9046 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koeficijent trenja:

Tablica 5.4 (Kreuh, Generatori pare) : $\lambda_z = 0,0215$ $\lambda_p = 0,0179$

$$\Delta p_1 = \lambda_z \cdot \frac{L_{srz}}{d_{zu}} \cdot \frac{w_{srz}^2}{2} \cdot \rho_{sr} + \lambda_p \cdot \frac{L_{srp}}{d_{pu}} \cdot \frac{w_{srp}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 2602,52 \text{ Pa}$$

3.2.3.2. Pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi

$$R_L = 0,08 \text{ m} \quad \frac{R_z}{d_z} = 2,5157 \quad \zeta = 0,2 \quad \text{tablica 5.3 (Kreuh, Generatori pare)}$$

$$\sum \zeta = 2 \cdot \zeta = 0,4$$

$$\Delta p_2 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{srz}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 132,6 \text{ Pa}$$

3.2.3.3. Pad tlaka zbog prijelaza iz cijevi u kolektor ili iz kolektora u cijevi

$$\zeta = 1,1 - 1,5 \quad \text{odabrano} \quad \zeta = 1,3$$

$$\sum \zeta = 19 \cdot \zeta = 24,7$$

$$\Delta p_3 = \sum \zeta \cdot \frac{w_{srp}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 9145,95 \text{ Pa}$$

3.2.3.4. Ukupan pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = 11881 \text{ Pa}$$

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršen je proračun za vrelovodni kotao za dogrijavanje vrele vode. Trebalo je ispitati proračunom može li postojeći kotao ložen teškim loživim uljem udovoljiti zahtjevima loženja na prirodni plin.

Proračun jasno pokazuje pri loženju na plin smanjenje izmijenjene topline u ložištu, te veću temperaturu dimnih plinova na izlazu iz ložišta. Taj višak topline potrebno je bilo izmijeniti u konvektivnom dijelu kotla, u zagrijačima. Da bi se ostvario taj povećani prijenos topline, uz zadržavanje jednake toplinske snage, povećan je protok kroz konvektivni dio, a smanjen u ekranima ložišta.

Ove izmjene i loženje na plin rezultirale su povećanom izlaznom temperaturom dimnih plinova, i većim padom tlaka u zagrijačima vode. Stupanj djelovanja kotla se smanjio, ali u prihvatljivoj granici, što dovodi do zaključka da kotao zadovoljava zahtjeve za loženje na prirodni plin.

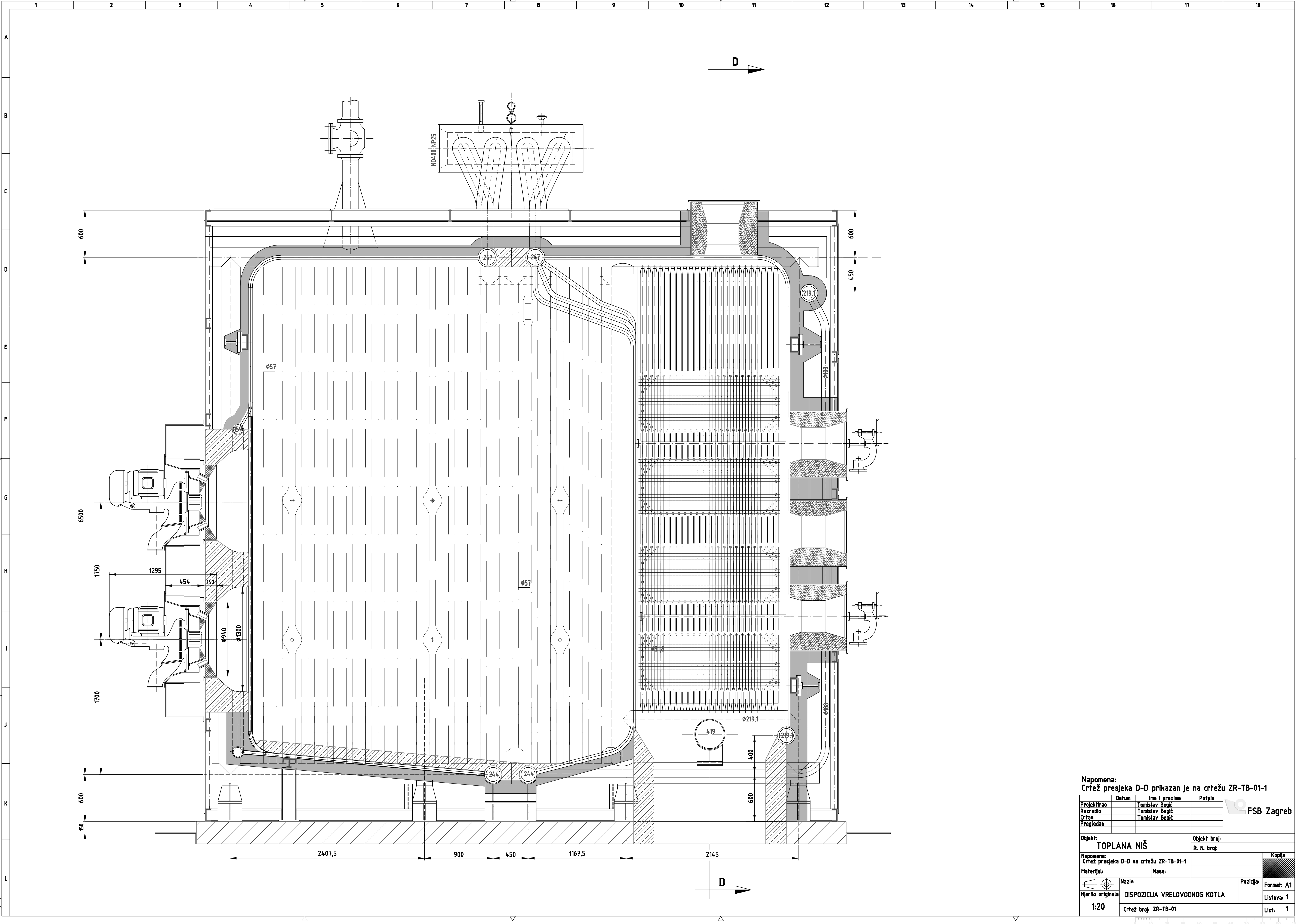
LITERATURA

- [1] Đurić, V., Bogner, M.: Parni kotlovi, Beograd, 1980.
- [2] Schneider, R.: Plinska ložišta i plinski plamenici- interna skripta FSB-a
- [3] Kreuh, L.: Generatori pare, Zagreb 1798.
- [4] Galović, A.: Termodinamika 2, Zagreb 2003.

PRILOZI

I- CD-R disc

II- Tehnička dokumentacija



Napomena:

Crtež presjeka D-D prikazan je na crtežu ZR-TB-01-1

	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao		Tomislav Begić	
Razradio		Tomislav Begić	
Crtao		Tomislav Begić	
Pregledao			

Objekt:

TOPLANA NIŠ

Objekt broj:

R. N. broj:

Napomena:

Crtež presjeka D-D na crtežu ZR-TB-01-1

Materijal:

Masa:

Naziv:

DISPOZICIJA VRELOVODNOG KOTLA

Pozicija:

Format: A1

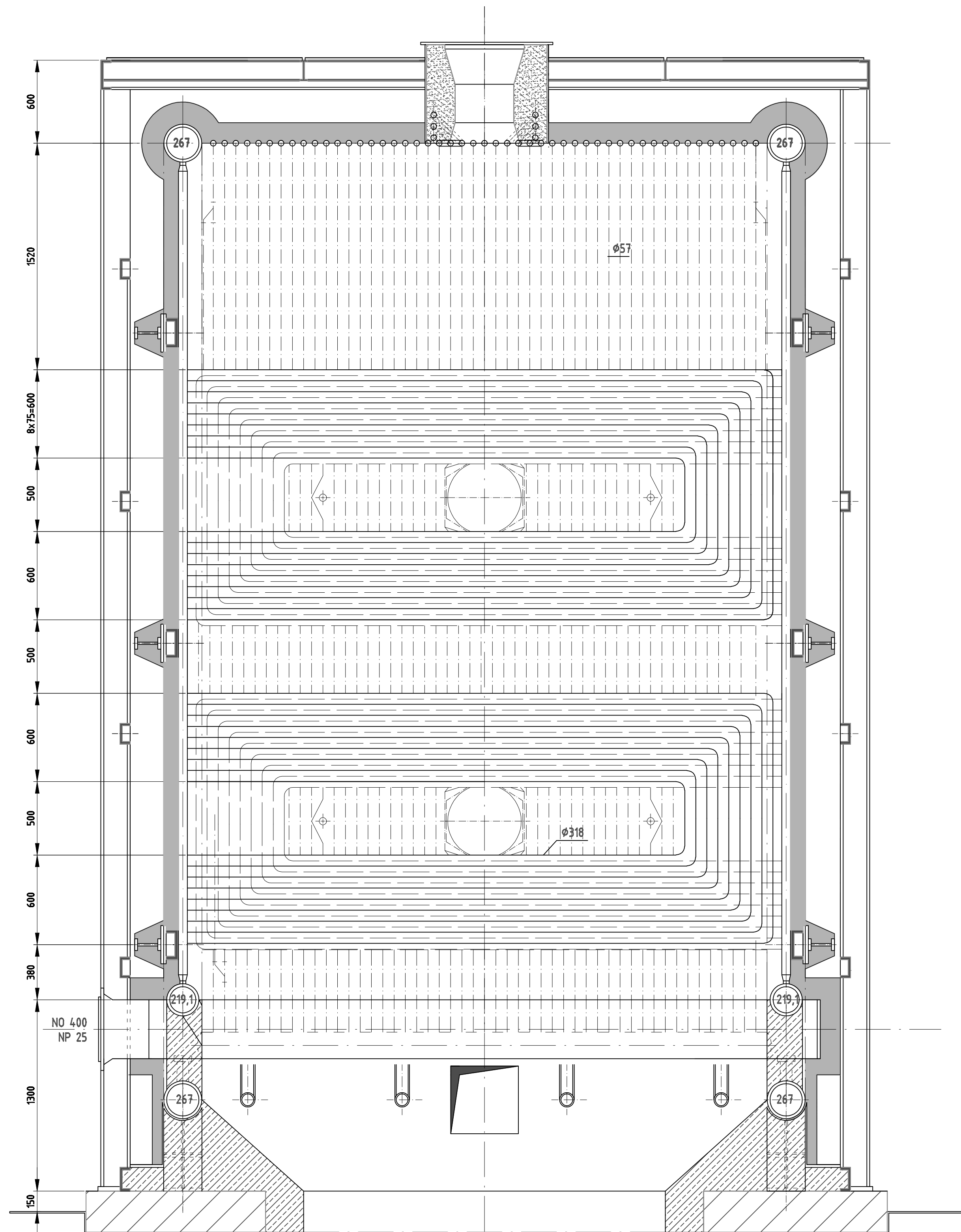
Mjerilo originala

1:20


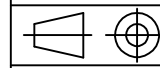
Crtež broj: ZR-TB-01

List: 1

FSB Zagreb



Presjek D-D

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao		Tomislav Begić		
Razradio		Tomislav Begić		
Crtao		Tomislav Begić		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
TOPLANA NIŠ			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:			Masa:	
 Mjerilo originala			Naziv:	
PRESJEK D-D			Pozicija:	
1:20			Format: A1	
Crtež broj: ZR-TB-01-1			Listova: 1	
			List: 1	